

绕射辐射振荡器的工程设计 方法与实验验证

于善夫 陈嘉钰 张富鑫 林崇文

(成都电讯工程学院高能所)

摘要——本文详细讨论了绕射辐射振荡器(Orotron)的工程设计方法。包括:开放式谐振腔的工程设计;反射绕射栅的工程设计;电子效率;工作电压和工作电流、起振电流等几个方面。根据已有的实验,本文对提出的工程设计方法进行了实验验证,取得了满意的结果。在2000~4000 V的工作电压范围内,得到了频率为60~87 GHz的微波振荡;最大输出功率为800 mW;最小起振电流为30 mA。

一、引 言

自1966年Ф. С. Русин^[1]首次提出绕射辐射振荡器的专题报告以来,苏联的科学家们对这一问题进行了大量的理论研究和实验研究,其发展历史大体可分为四个阶段:1. 平行平面镜开放式谐振腔绕射辐射振荡器;2. 半球型开放式谐振腔绕射辐射振荡器;3. 球柱型和双柱型开放式谐振腔绕射辐射振荡器;4. 同轴型开放式谐振腔绕射辐射振荡器,相对论电子注绕射辐射振荡器以及其它一些变态。

苏联科学家B. П. 色士多巴洛夫等人使绕射辐射振荡器从实验室阶段走上了实际应用阶段做出了重要的贡献,大大推动了这种新型毫米波、亚毫米波电子器件的发展^[2~4]。

本文的目的在于通过理论分析以及实验研究,提出绕射辐射振荡器的工程设计方法;并通过一系列的冷测实验和整管研制的热测实验来验证所提出的工程设计方法。

二、开放式谐振腔的设计

绕射辐射振荡器与其它分布作用振荡器的主要区别是采用开放式谐振腔作为一种选择性的反馈元件。图1为原理分析图。上镜为球面镜, x 、 y 方向的曲率半径分别为 R_{2x} 、 R_{2y} ;下镜为柱面镜, x 、 y 方向的曲率半径分别为 R_{1x} 、 R_{1y} 。开放式谐振腔与通常的封闭式谐振腔

相比较,最重要的特点是具有很高的 Q 值和小的频谱密度。带有绕射栅的开放式谐振腔,由于欧姆损耗和绕射损耗增大,频谱密度更小。

开放式谐振腔具有足够高的 Q 值,这是本设计和计算的出发点。根据已有的实验和理论^[1~5],一般取开放腔加载 Q 值 $Q_H=2 \times 10^4$ 。

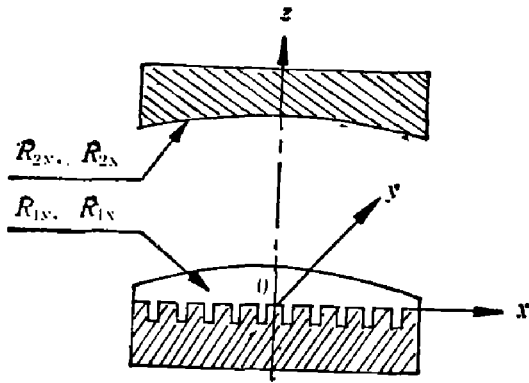


图1 原理分析图

Fig. 1 The principle diagram.

镜间距离

$$H = Q_H / 4\delta; \quad (1)$$

式中, δ 为趋肤深度。

上、下反射镜的口径为 a_x, a_y ;其关系式为

$$a_x \times a_y = a^2 = N\lambda H; \quad (2)$$

一般取 $N=5 \sim 6$; $a_y > a_x$; $2a_x$ 为 x 方向的尺寸; $2a_y$ 为 y 方向的尺寸。

光栅长度为

$$L = 2a_x \quad (3)$$

在 x 方向上,反射镜曲率半径 R_{2x} 确定如下:

$R_{1x} = \infty$, $g_{1x} = 1 - (H/R_{1x}) = 1$; 落在光栅上的光斑尺寸 $2W_{1x} = (0.45 \sim 0.5)L$ 时,绕射损耗开始变得明显^[3,8],由此确定 W_{1x} 。由

$$\begin{aligned} W_{1x} &= \sqrt{\frac{\lambda H}{\pi}} \cdot \frac{1}{\beta_{1x}}; \\ \beta_{1x}^4 &= \frac{g_{1x}}{g_{2x}} (1 - g_{1x}g_{2x}); \\ g_{2x} &= 1 - \frac{H}{R_{2x}}; \end{aligned}$$

可得

$$R_{2x} = \frac{H}{\beta_{1x}^4 g_{2x}}. \quad (4)$$

在 y 方向,上、下反射镜曲率半径 R_{2y}, R_{1y} 确定如下:

为了加工工艺的方便,通常取 $R_{2y} = R_{1y}$,即

$$\begin{aligned} g_{1y} = g_{2y} = g_y &= 1 - (H/R_{1y}) = 1 - (H/R_{2y}) \\ \beta_{1y}^4 &= 1 - g_y^2 \end{aligned}$$

在 y 方向的场分布为

$$U_n \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right) = C_n H_n \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right) e^{-\frac{y^2}{W^2}}; \quad (5)$$

式中, $W = \sqrt{\frac{\lambda H}{\pi}} \cdot \frac{1}{\beta_{1y}}$ 为 TEM_{00q} 模的场斑在 y 方向的半径; $C_n = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{W \cdot 2^n \cdot n!} \right)^{1/2}$; $H_n \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right)$ 为厄米多项式;

对 TEM_{02q} 模(工作模式), $n=2$;

$$H_2 \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right) = 4 \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right)^2 - 2. \quad (6)$$

在 y 方向的场斑尺寸应小于 y 方向口径的一半,即在 $y = \pm a_y/2$ 处场的幅值 $U_m \left(\frac{\sqrt{2}}{W} y \right)$ 应为最大值的 e^{-1} 。由此确定 W, R_{2y} 。

下反射镜面上中部场斑宽度为

$$W_{1y} = W = \sqrt{\frac{\lambda H}{\pi}} \cdot \frac{1}{\beta_{1y}} \quad (7)$$

光栅宽度 B 为

$$W_{1y}/B = 0.71 \quad (8)$$

结构作如下考虑:

采用了通常的球柱型开放腔。上镜为球面镜,下镜为柱面镜。由于 x 方向曲率半径减小,使得场斑尺寸减小。这样牺牲了一些互作用长度。采用椭球型上反射镜虽是最理想的方案,但加工工艺困难。

冷测实验确定各参量如下:

在上述计算设计的基础上,通过冷测实验进一步选择各参量是十分必要的^[1~3]。用实验方法确定开放腔和光栅参量的依据是: $Q_H \approx 0.6 \sim 0.8 Q_{\max}$; 在调节范围内变化镜间距离时,场的幅值 A 平稳。在 $Q_{\max} = 2.5 \times 10^4$ 的条件下,球柱型开放腔的各参量如表 1 所示。

表 1 球柱型开放腔参量

Table 1 Parameters of the sphere-cylindrical open resonator

参 量	$\lambda = 8 \text{ mm}$	$\lambda = 4 \text{ mm}$	$\lambda = 2 \text{ mm}$
$R_s = R_c (\text{mm})$	156	110	80
$H (\text{mm})$	36	25	18
$a_y \times a_x (\text{mm})^2$	50×35	30×20	20×11
$B (\text{mm})$	17	10	6

三、反射绕射栅的工程设计

反射绕射栅各参量的选取直接影响器件的频率、电子效率、工作电压、最小起动电流等^[1,6]。根据文献[1],若要使起动电流最小;反射绕射栅的周期 l 和工作波长 λ 的最佳比值应为 $1/3$,相应的同步电压为 28333 V。设计时应折衷考虑这一问题,或者为突出某一特性,可根据专门的要求进行设计。

一般,取

$$l/\lambda = 0.1 \quad (9)$$

此时槽宽 d 和周期 l 的最佳比值为

$$d/l = 0.4 \quad (10)$$

槽深

$$h = 1/4\lambda \quad (11)$$

四、电 子 效 率

大信号理论分析的结果指出^[9,11],效率与最佳互作用长度及参量 F_0 有关。在忽略了空间电荷的高频分量的条件下,二维理论电子效率可达 30%;这和实际器件的 η_0 十分相近,见图 2 和图 3。

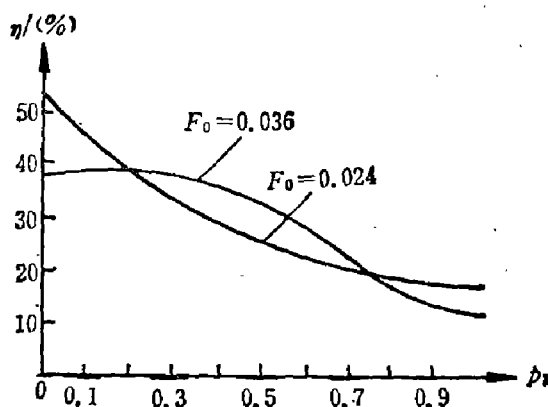


图2 电子效率和电子注厚度的关系

Fig. 2 Relation between electron efficiency and thickness of the electron beam.

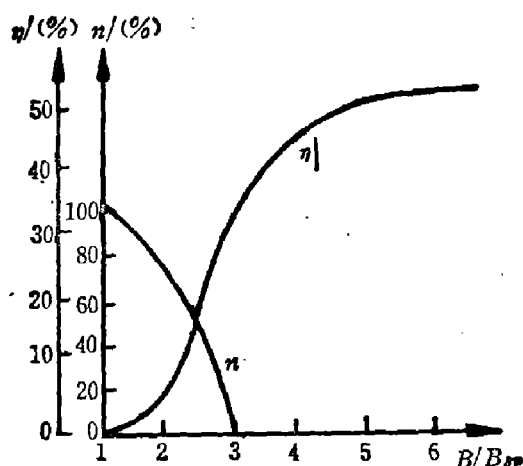


图3 效率、电子百分比与磁场的关系

1—效率与磁场的关系 2—散落在绕射栅上的电子百分比与磁场的关系

Fig. 3 Relations between efficiency, percentage of the electrons and magnetic field.

五、工作电压、工作电流、起振电流

以上各部分的设计和计算,实际上已经考虑了器件的工作电压、工作电流、以及起振电流的要求。

工作电压(V)

$$U_0 = 2.55 \times 10^5 (l/\lambda)^2; \quad (12)$$

工作电流(A)

$$I_0 = P_1 / U_0 \eta_e; \quad (13)$$

式中, P_1 为单位时间的贮能。

根据文献[2],可以推导出球柱型开放式谐振腔以及双柱型开放式谐振腔绕射辐射振荡器的起振电流表达式^[4]

$$I_{st} = 1.04 \times 10^{-5} \times \frac{S_0 U_0^{3/2}}{\Gamma D^3} \varphi_p^2; \quad (15)$$

式中,

$$\varphi_p^2 = \frac{a^3}{0.6700 - 0.00203a^5 + 0.02437a^2 - 0.07614a^3};$$

$$Q = \frac{\delta_{smn} \cdot \sigma_{smn} \cdot Q_{mn} F_{mn}^{max}(a, \varphi, 0)}{\Gamma \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{1}{a} \cdot \Phi_n^{(2)}(a)};$$

$$\delta_{smn} = \frac{|A_s|^2}{|A_0|^2} \cdot \frac{1 - e^{-2\eta_{s0}/l}}{h_s l} \cdot \frac{\Phi_m^{(2)}(\sqrt{2}\eta_0) \Phi_n^{(2)}(a)}{2^{n+m} \cdot m! \cdot n!}$$

$$\sigma_{\text{smn}} \approx 0.5 \sim 0.7; \quad \left| \frac{A_1}{A_0} \right|^2 \approx 0.5;$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{k}{2A_x}} \cdot \frac{x_0}{2}; \quad a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{A_y}} D;$$

$$A_y = \sqrt{L(R_y - L)}; \quad A_x = L/\beta_{10}^4;$$

$\Phi_n^{(2)}(a)$, $\Phi_m^{(2)}(\sqrt{2}\eta_0)$ 都是高斯积分^[8], $F_m(a, \varphi, \varphi_p)$ 为非同步参量。在 $m=0$ 时, $F_0^{\text{max}}(a, \varphi, \varphi_p)$ 与 a 的关系由图 4 给出^[8]。

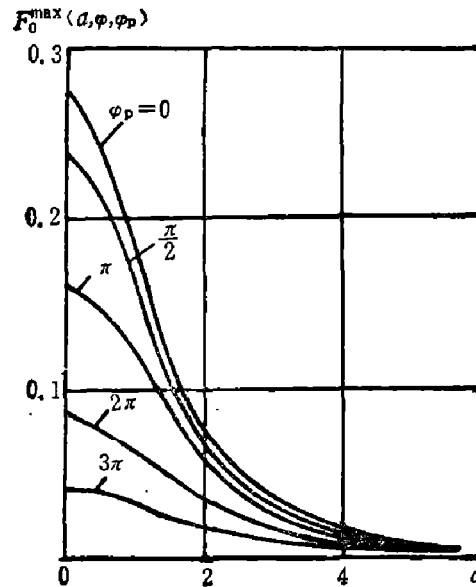


图 4 $F_0^{\text{max}}(a, \varphi, \varphi_p)$ 和 a 的关系 ($0 \leq \varphi_p \leq 3\pi$)

Fig. 4 Curves of $F_0^{\text{max}}(a, \varphi, \varphi_p)$ vs a .

六、电子光学系统的工程设计

理论分析的结果指出^[10~11]:

1. 起振需要最小磁场值为

$$B_{\min} = \frac{22.5\sqrt{U_0}}{d} = \frac{1500\sqrt{J_0}}{U_0^{1/4}}. \quad (16)$$

2. 电子光学系统的最佳几何尺寸为:

对于厚电子注, 阴极发射面相对于阳极缝和周期结构表面对称放置。对于薄电子注, 阴极发射面的下沿接近于阳极孔的中心线和周期结构的表面。

3. 在保证电流密度的前提下, 增加阴极与阳极之间的距离, 可以减小所需的磁场值。

4. 随着与电流密度有关的频率的增加, 最低磁场值在 $\omega^{1/4} \sim \omega^{1/2}$ 的范围内增加。

在保证最大电子效率的条件, 工作磁场大于 6 倍的布里渊磁场值, 这一点已被实验所证实^[3, 8]。当 $B < B_{\min}$ 时, 起振电流值急剧增大, 当 $B > B_{\min}$ 时, 起振电流随磁场的增加而慢慢降低^[18]。

七、实验验证结果

作者通过一系列的冷测实验, 动态可折系统上的热测实验, 以及实际整管研制的测试,

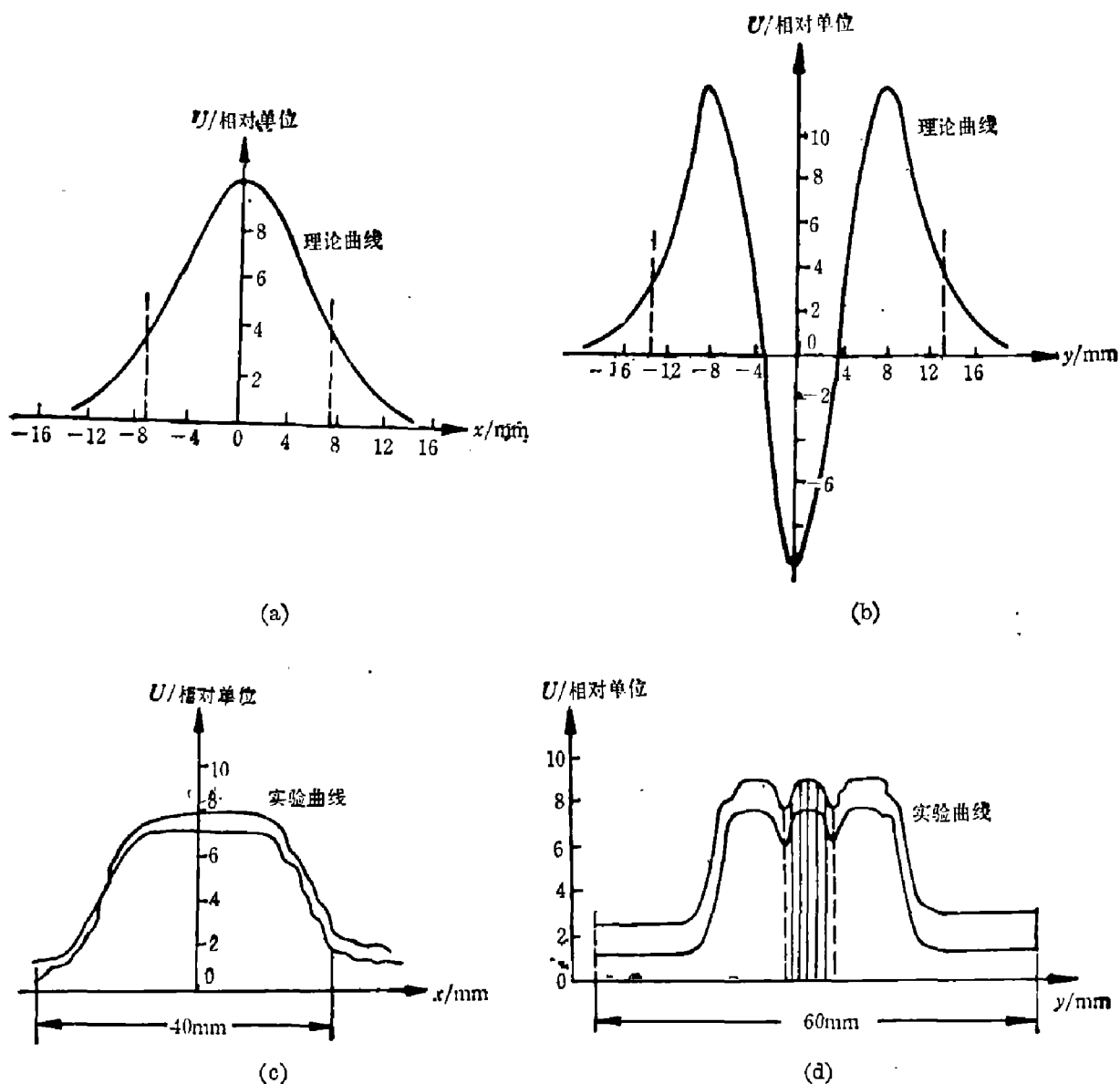


图5 场分布曲线
Fig. 5 Curves of field distribution.

对一只工作在 4 mm 波段的球柱型开放式谐振腔绕射辐射振荡器做了详细的研究^[17]；并得到了初步实验结果,从而验证了本文提出的工程设计方法。

用一台自制的专门用于场分布测试的微扰机构,通过 x - y 自动记录仪,在测试中自动地描绘出场分布图形。这种方法和装置被成功地应用于各种类型准光腔的冷测中。冷测得到的 y 方向, x 方向的场分布示于图 5。

采用动态测试的方法对工作在 TEM_{02q} 模的球柱型开放腔的 Q 值进行了冷测^[12]。冷测结果指出,不带光栅的开放腔的有载品质因数 $Q_H^0 = 1.6 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$; 带有光栅的开放腔的有载品质因数 $Q_H = 4800 \sim 6500$ 。

热测是在一个动态可拆真空系统上进行的。后来,又依据动态系统的各种参量进行了实际的整管研制,获得了成功。在 2000~4000 V 的工作电压范围内都测到了 4 mm 波段的高频振荡功率。最小起振电流为 30 mA; 频率范围为 60~87 GHz; 最大输出功率为 800 mW。如果进一步提高装配精度和电子注的质量,可望大幅度提高功率。热测的典型曲线

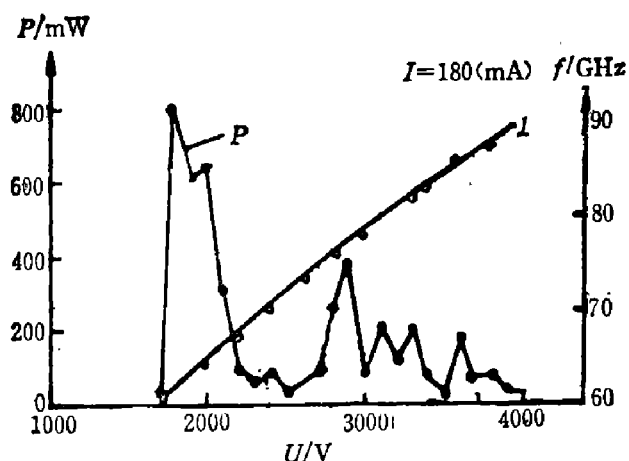


图6 功率和频率与电压的关系

Fig. 6 Relation of power and frequency with operating voltage.

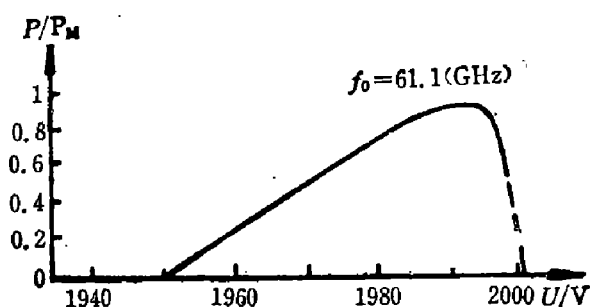


图7 某一模式的电压范围

Fig. 7 The voltage range on a certain mode.

示于图6和图7。表2给出了理论设计与实验结果的比较。其中管1是根据文献[2]的实验结果,管2是本文实验的结果。

应当指出,实验验证工作还应在毫米波、亚毫米波的各波段上进行。

表2 器件参量的理论值和实验设计值的比较

Table 2 Experimental design values compared with the theoretical results of the device parameters.

参 量	理 论 值	管 1	管 2
Q_H	2.0×10^4	/	2.0×10^4
Q_{021}	5000	5000	4800~6500
$R_s = R_c$ (mm)	108	110	110
周期 l (mm)	0.4	0.4	0.4
槽深 h (mm)	1.0	0.92	0.88
耦合隙缝 (mm) ²	$\phi 0.7$	3.6×0.1	3.1×0.1
同步电压 U_0 (V)	2500	2500	2500
最小起振电流 I_{st} (mA)	21.9	22	30
中部场斑尺寸 (mm)	7.05	/	7
y 方向场斑尺寸 (mm)	25.4	/	29
x 方向场斑尺寸 (mm)	15.2	/	22
中部场斑中心位置 (mm)	31	/	31
电子柱尺寸 (mm) ²	/	10×0.3	10×0.3

致谢——关于绕射辐射振荡器的理论和实验研究工作都是在刘盛纲教授的指导下进行的,作者对此致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Русин Ф. С. *Электроника больших мощностей*, М. Наука, (1968), 5: 9~37.
- [2] Ревен И. Д. и др., *изв. вузов Радиофизика*, 20(1977), 5: 764~776'.
- [3] Корнеев В. К. и др., *изв. вузов радиофизика*, 20(1977), 2: 290~299
- [4] Шестопапов В. П., *Дифракционная электроника*, горьков, Випа школа, 1976.
- [5] Вайнштейн Л. А., *Открытые резонаторы и открытые волноводы*, Сов. радио, 1966.
- [6] 于善夫, 成都电讯工程学院硕士学位论文, 1981.
- [7] 方洪烈, 光学谐振腔, 科学出版社, 1981.
- [8] Русин Ф. С. И Богомолов Г. Д., *Электроника больших мощностей*, М. Наука. (1968). 5: 38~44.
- [9] Болявский В. А. И Цейтлин М. В., *Радиотехника и Электроника*. 25(1980), 5: 1108~1112.
- [10] 陈嘉玉等, 成都电讯工程学院学报, (1983), 3: 57.
- [11] Цейтлин М. В. И ДР. *Радиотехника и электроника*, 22(1977), 7: 1515.
- [12] 林崇文等, 成都电讯工程学院学报, (1983), 2: 69.
- [13] 张富鑫、林崇文, 成都电讯工程学院学报, (1984), 4: 94.
- [14] Wortman D. B. et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 17(1981), 1341~1348.
- [15] Smith S. J. and Purcell E.M., *Phys. Rev*, 92(1953), 4: 1069~1073.
- [16] 于善夫, 成都电讯工程学院学报, 1985, 增刊 101,
- [17] 陈嘉钰等, 成都电讯工程学院学报, (1986), 3: 1.

THE ENGINEERING DESIGN METHOD AND EXPERIMENTAL CHECKING OF DIFFRACTION RADIATION OSCILLATOR

YU SHANFU, CHEN JIAYU, ZHANG FUXIN, LIN ZHONGWEN
(Chengdu Institute of Radio Engineering)

ABSTRACT

An engineering design method of Diffraction Radiation Oscillator is given in detail. It covers the designs of the open cavity, the reflection diffraction grating, electron efficiency, operating voltage and current, and starting current. The above-mentioned designs are verified satisfactorily by experiments. In the range of 2000 to 4000 volts, the microwave oscillatory power is measured in the 60-87 GHz band. The maximum output power is 800 mw. The minimum starting current is 30 mA, This result is better than that obtained in US Army Electron Research and Development Command, Harry Diamand Laboratories.